

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-145564

(43)Date of publication of application : 20.05.2003

(51)Int.Cl.

B29C 43/02

F16B 19/00

F16B 35/00

// B21J 15/00

B29L 1:00

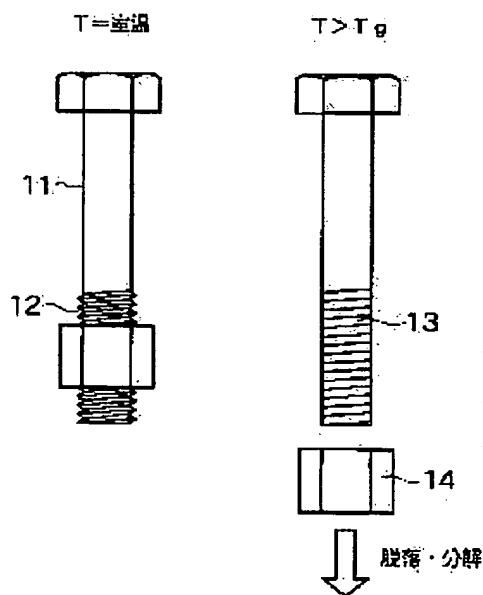
(21)Application number : 2001-342305

(71)Applicant : MITSUBISHI HEAVY IND LTD  
MEIRA CORP

(22)Date of filing : 07.11.2001

(72)Inventor : HAYASHI SHUNICHI  
OHASHI MAKOTO  
MATSUMOTO TAKEMI  
NAOI MANABU  
NAGATA SATOSHI

## (54) PLASTIC PROCESSING METHOD FOR SHAPE-MEMORY POLYMER AND FASTENING BODY



(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To materialize a fastening body which has enough fastening force at ordinary use temperatures but loses the fastening force when heated, to enable a large amount of disintegration and disassembly in a short time, and to facilitate low-cost, high-efficiency recycling.

SOLUTION: In the fastening body made of a shape-memory polymer, a part exhibiting a fastening function is molded by secondary forming. When the original shape of the fastening part before the secondary forming is formed primarily to be a shape having no fastening function, the fastening body loses its fastening force to be disintegrated easily when heated at its glass transition temperature or above. As the secondary forming method, cold plastic processing or a heating molding-cooling fixing method is used. As the shape-memory polymer, it is indispensable to have a large

shape-recovery ratio and a glass transition temperature which can be adjusted to be enough higher than room temperature, and a polyurethane shape-memory polymer is selected.

## \* NOTICES \*

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

## CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1]A plastic working method of shape memory polymer using rate of strain below  $14\text{-sec}^{-1}$  in plastic working of polyurethane system shape memory polymer.

[Claim 2]A plastic working method of the shape memory polymer according to claim 1 using peripheral speed below  $3.8 \times d_0 \text{ cm/sec}$  about peripheral speed of axial rotation in plastic working including forming of rolling when a diameter of a raw material before processing is made into  $d_0$ .

[Claim 3]A plastic working method of the shape memory polymer according to claim 1 or 2 characterized by cooling this polymer below to  $T_g - 45$  \*\* when glass transition temperature of this polymer is made into  $T_g$  in plastic working of polyurethane system shape memory polymer.

[Claim 4]It is a joining body which all become from polyurethane system shape memory polymer in part in a joining body which consists of shape memory polymer, A joining body having at least one or more shape chosen from a group which becomes this polyurethane system shape memory polymer portion from heights, a crevice, an uneven part, a thread part, and an inclined part which exhibit a conclusion function.

[Claim 5]The joining body according to claim 4, wherein secondary size enlargement of some or all of a part that exhibits said conclusion function is carried out using the processing method according to any one of claims 1 to 3, or hot forming and a cooling fixing method.

[Claim 6]In the joining body according to claim 5, it has a conclusion function part which consists of polyurethane system shape memory polymer, a time of making into  $D_1$  an inside diameter of a conclusion function part of a female form joining body which makes  $d_0$  an outer diameter in front of  $d_1$  and secondary size enlargement, and serves as a fitting partner in an outer diameter in this conclusion function part, or a fitting part — a lower type (1) — and (2)

$d_0 < D_1$  (1)

$d_1 > D_1$  (2)

A joining body of a male form characterized by producing this conclusion function part using the processing method according to any one of claims 1 to 3, or hot forming and a cooling fixing method so that it may fill simultaneously.

[Claim 7]In the joining body according to claim 5, it has a conclusion function part which consists of polyurethane system shape memory polymer, When an outer diameter of a conclusion function part of a male form joining body which makes  $D_0$  an inside diameter in front of  $D_1$  and secondary size enlargement, and serves as a fitting partner in an inside diameter in this conclusion function part, or a fitting part is made into

$d_1$ , it is  $d_1 < D_0$  (3).

$d_1 > D_1$  (4)

A joining body of a female form characterized by producing this conclusion function part using the processing method according to any one of claims 1 to 3, or hot forming and a cooling fixing method so that it may fill simultaneously.

[Claim 8] In the joining body according to claim 5, it has a conclusion function part which consists of polyurethane system shape memory polymer, An outer diameter in front of  $d_1$  and secondary size enlargement is made into  $d_0$  for an outer diameter in this conclusion function part, When an inside diameter in front of  $D_1$  and secondary size enlargement is made into  $D_0$  for an inside diameter of a conclusion function part which consists of polyurethane system shape memory polymer of a female form joining body which serves as a fitting partner, or a fitting part, it is  $d_0 < D_0$  (5).

$d_1 > D_1$  (6)

A male form characterized by producing a conclusion function part of a male form joining body and a conclusion function part of a female form joining body, or a fitting part using the processing method according to any one of claims 1 to 3, or hot forming and a cooling fixing method so that it may fill simultaneously, and a joining body of a female form.

[Claim 9] Heights which exhibit a conclusion function in a joining body which consists of shape memory polymer, A decomposing method which decomposes a joining body where had at least one or more shape chosen from a group which consists of a crevice, an uneven part, a thread part, and an inclined part, and heat this conclusion function part more than glass-transition-temperature  $T_g$ , it made it soften and segregation load of a joining body is reduced.

## DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to joining bodies, such as fasteners, such as the fastening part which performs conclusion with a thing and a thing, such as attaching parts to a main part or combining members, especially a screw thread, a bolt, a nut, a rivet, a clip, a clamp, and a snap fitting.

[0002]

[Description of the Prior Art] Electric appliances including electronic equipment and home electronics, a machine product, etc. consist of many parts, and are assembled with the screw thread or the fastening part of many including a rivet. However, in order to disassemble and recycle these products and to use resources effectively, decomposition cost poses a big problem. Since it will also become possible theoretically to change shape bordering on a certain temperature, and to abolish fastening force if the joining body which consists of shape memory materials (an alloy, polymer, etc.) is used, as a joining body of decomposition and recycling, and a premised product, it excels dramatically. Therefore, it looked forward to the realization of a joining body based on such a thermal decomposition concept.

[0003] The application to the pin with a bundle using a shape memory material which concludes using the heating shape recovery characteristic as a joining body is already published for an alloy and polymer

(Masahiro Irie editorial-supervision: "material development of shape memory polymer", CMC, p.25, 1989.). The fundamental proposal is already indicated also about the joining body which realizes a disassembler contrary to conclusion using the same characteristic (for example, JP,7-4407,A). However, although just the fundamental proposal is made about the joining body which gave temperature dependence to such fastening force, utilization is not yet made. This is because processing (secondary size enlargement or secondary shaping) was difficult in the shape recovery characteristic being small in the material into which that and the conventional trial production have been performed by that and polymer with the alloy. Therefore, it becomes the 1st step towards utilization to find out the material which has sufficient moldability and the shape recovery characteristic, and cost evaluation is also eventually needed.

[0004]When an alloy is compared with polymer about this material selection, the polymer of the shape recovery characteristic is overwhelmingly larger. Although the value is not usually filled with an alloy to 10%, the thing exceeding 100% also exists in polymer. It is in cost and overwhelmingly advantageous. Shape memory polymer is cheap in kg and 5000 yen /in general to the Ti-nickel system alloy which is a typical shape memory alloy being hundreds of thousands of yen/kg. Thus, since it is excellent in the shape recovery characteristic, its flexibility of a design is large, and since shape memory polymer is low cost, also when replacing the present joining body, it is overwhelmingly advantageous. Therefore, this invention persons chose shape memory polymer from this reason as a material, and considered application to a joining body. As described above, it was shape memory polymer outstanding in material, but the practically big problem existed about processing (secondary size enlargement) art.

[0005]Generally the molding methods of shape memory polymer are injection molding, extrusion molding, cast molding, blow molding, etc., and can fabricate and memorize desired shape with these techniques (primary size enlargement or primary shaping). In order to perform modification from this state, it heats more than glass-transition-temperature  $T_g$ , and polymer is made to change to a rubbery field. It becomes possible, once it uses a rubbery state to make it change easily, and the shape is fixable if it cools below to  $T_g$ , with a deformed state maintained. Usually, it did in this way and new shape is given to the shape which carried out primary size enlargement (secondary size enlargement or secondary shaping). Since the deformed state is only maintained by the reversible phase (soft segment) by which forcible immobilization is carried out temporarily, if it heats again more than  $T_g$ , the mold goods after secondary size enlargement can be in a rubbery state, and can recover memory shape (shape of primary size enlargement).

[0006]However, plastic deformation is performed after heating, since this secondary size enlargement method (hot forming and cooling fixing method) that fixes shape by cooling needs the thermo cycle of temperature up and a temperature fall, time is taken, productivity is low and cost is also this method.

It was not used for mass production.

Then, in addition to the technique of hot forming and cooling immobilization whose molding accuracy is comparatively high, this invention persons came to examine the cold-forming method the productivity hardly tried conventionally is high, as a secondary size enlargement method to polymer, although productivity was inferior. however — since shape memory polymer is a viscoelastic body, compared with metal, its deformability is small — modification — easy — a white blush mark — in order to cause — embrittlement, it is expected the cold forming itself and that it is very a technique accompanied by difficulty — the fact — it was right. Although press working of sheet metal, forging processing, and forming of rolling which are

specifically typical plastic working methods were actually tried, deformation sufficient on the conditions conventionally used with metal was not able to be obtained.

[0007]In order to explain concretely that plastic working is difficult, thread rolling is taken up as an example. This molding method is the method of transferring the shape minced by the dice by rolling a form-rolling raw material between the dices of plurality (usually two).

It is used for the screw-thread manufacture which is a typical joining body.

The rolling speed of this form-rolling method has been one index, and, in the case of a metal screw thread, the production rate (equivalent to the stroke speed of a dice) by a flat-dies (board dice) form-rolling board is usually 100-400 part grade for /. Thus, form rolling is performed at high speed in order to secure productivity, but the direction of high-speed form rolling is said for the surface to become smooth. Since the low-speed form rolling cannot use the inertia of a flywheel, it requires big load for a motor, and it is not preferred on structure. The rolling speed (\*\*\*\*\* is the speed of the periphery of \*\*) of the raw material at this time will have been about 20-80 cm/sec in speed in the screw thread of M6 class by JIS.

[0008]About form rolling of polymer, although there are dramatically few examples of a report, for example in polypropylene. At a low speed, a screw thread does not stand too much, but the rolling speed of about 20 cm/sec or more is desirably required (\*\*\*\* Ken-ichi: a "trend of actual condition [ of a plastic screw thread ], and research" Japan screw-thread research association magazine, 22 volumes, No. 12, p.385, 1991.). This suggests that deformability has a rolling-speed dependency.

It seems that the material property of becoming difficult to carry out plastic deformation is shown if the rolling speed is lowered.

In low-speed form rolling not more than it, as well as a screw thread not standing, a slide arises at the time of form rolling, and the problem on the mechanism of the form rolling itself becoming impossible is also pointed out. Therefore, when carrying out form rolling of the polymer, a possibility that a rolling speed has a minimum must be taken into consideration.

[0009]On the other hand, in high-speed form rolling, since raw material temperature rises with heat by deformation and frictional heat, the problem of generation of heat must also be taken into consideration. The rise in heat by such generation of heat should have influence greater than metal for polymer, and also in order to suppress generation of heat, it seems that the to some extent later one of a rolling speed is desirable. It is because thermal conductivity is lower than metal, so it will be hard to diffuse heat and a material property will change with rises in heat a lot further in polymer. In the case of shape memory polymer which is especially thermoplastics, when a raw material carries out temperature up more than glass-transition-temperature  $T_g$ , the screw thread once fabricated at the time of form rolling carries out shape recovery immediately after secession from rolled dies, and a possibility that a screw thread will not fully stand may be expected.

[0010]When the rolling-speed dependency of the screw-thread outer diameter was measured based on the above examination, even if it was a desirable rolling speed (about 20-50 cm/(sec)) in the polypropylene indicated to said report, a screw thread hardly stood. The shape memory polymer used in this experiment is a thing of a polyurethane system, and glass transition temperature chose the thing higher enough than 55 \*\* and a room temperature. It cooled in consideration of generation of heat. In order to carry out plastic working of the shape memory polymer as the example in this form rolling shows, a different effect from

metal must be taken into consideration, and though natural, processing conditions also differ from metal. The processing conditions of polymer with the example of a report were not able to be applied directly, either. Thus, in conventional technology, secondary size enlargement could not be efficiently given to shape memory polymer, and the joining body which has a thermal decomposition function was not able to be put in practical use by shape memory polymer as a result.

[0011]

[Problem(s) to be Solved by the Invention]As stated above, about the joining body which gave temperature dependence to fastening force using the shape memory material which recovers shape bordering on a certain temperature, A concrete material which may put it in practical use at the shape recovery characteristic, cost, a molding method, and all the points did not yet become clear, but although shape memory polymer was chosen in respect of the degree of shape recovery, and material cost, there was no secondary size enlargement method that productivity was high. Therefore, though it had fastening force sufficient at a room temperature, it did not yet realize but the joining body which loses fastening force above glass-transition-temperature  $T_g$  was a technical problem with the big realization of a joining body itself which has the above-mentioned disassembler not to mention mass production.

[0012]Though this invention was made in order to solve such a technical problem, and it has fastening force sufficient at a room temperature, it aims at realization of the joining body which loses fastening force above glass-transition-temperature  $T_g$ . While selecting and developing the shape memory polymer which was specifically suitable for such a joining body, it is applying hot forming and a cooling fixing method as a secondary size enlargement method, or newly developing the cold-forming method. It is providing a realistic fastening part and decomposing method using these materials or a processing method. The still more nearly following technical problems can be considered about the latter. For example, since decomposition is not attained only by heating when the shape recovery characteristic is imperfect, it is expected that the technique of realizing decomposition such even case is also needed.

[0013]

[Means for Solving the Problem]A technical problem described above was solved, and in order to attain a place made into the purpose of this invention, selection and development of material which can realize easily a concept of a joining body which can be decomposed with heating in this invention were performed in the first place. Shape memory polymer which this invention persons selected is polyurethane system shape memory polymer (the Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. development, brand-name diary). It has no less than 400% of shape recovery characteristic, and material cost is also cheap in kg and about 3000 yen /. Since the range of shape recovery temperatures (glass-transition-temperature  $T_g$ ) is wide compared with other shape memory polymer as shown in Table 1, Flexibility at the time of setting up decomposition temperature is large, and if a joining body with different  $T_g$  is used, alternative decomposition will also be attained by raising decomposition temperature gradually. Since the range is extended to the elevated-temperature side, a large difference of anticipated-use temperature of a product and decomposition temperature can be taken, and danger of incorrect decomposition can be made small as much as possible.

[0014]

[Table 1]

表 1 主な形状記憶ポリマーの形状回復温度（ガラス転移温度  $T_g$ ）

材料	ポリウレタン系（ダイアリイ）	スチレン-ブタジエン系	トランスポリイソプレン系	ポリノルボルネン系
形状回復温度（℃）	-30~120	60~90	67	35

（主に、東レリサーチセンター編：「形状記憶ポリマーの新しい応用展開」による。）

[0015]About the second technical problem, i.e., a plastic working method of this material, an experiment and a trial production were actually performed and that condition was newly found out. A moldability to a screw thread of M6 class was examined in detail using a diameter  $\phi 5.2$ mm round bar material, using form rolling mainly as a secondary size enlargement method. As a result, plastic deformation irreversible deformation found out that it was greatly dependent on a rolling speed (rate of strain) and working temperature, and drew conditions required for processing to each. Hereafter, The means for solving a technical problem is described with the operation.

[0016]Drawing 2 is the graph which showed clearly that how to stretch a screw-thread outer diameter has a rolling-speed dependency. In order to make a screw thread stand as explanation in the example, a rolling speed must be below 20 cm/sec at least, and especially a desirable rolling speed is below 5 cm/sec from a moldability. If considering a case where screw-thread size is changed from M6 class a material shaft outer diameter before processing is made into  $d_0$  as explanation in the example, below  $20 \times (d_0/5.2)$  cm/sec can rewrite rolling-speed conditions mentioned above. Especially as for desirable conditions, below  $5 \times (d_0/5.2)$  cm/sec becomes.

[0017]Drawing 3 is the graph which applied 1 axis approximation to the stress-strain characteristic in form rolling, and changed the rolling speed of drawing 2 into rate of strain. As explanation in the example, plastic working must be performed with the rate of strain below at least  $14\text{-sec}^{-1}$ , and especially desirable conditions are the rate of strains below  $4\text{-sec}^{-1}$  from a moldability. Therefore, the invention according to claim 1 aims at realization of plastic working by setting up the conditions of the above-mentioned rate of strain in the plastic-working method of this shape memory polymer.

[0018]The invention according to claim 2 aims at realization of forming of rolling by setting up the conditions of a rolling speed in the thread rolling of said shape memory polymer. These conditions are similarly realized about female screw part articles, such as not only an external threaded section article but a nut. Drawing 4 is the graph which showed the effect of cooling which appears in a screw-thread outer diameter (moldability of a screw thread). In order to make a screw thread stand as explanation in the example, cooling below  $T_g - (55-10) ^\circ\text{C}$  is needed at least, and especially desirable conditions are below  $T_g - 80 ^\circ\text{C}$  from a moldability.

[0019]Therefore, the invention according to claim 3 aims at realization of plastic working by setting up the conditions of the above-mentioned cooling temperature in the plastic-working method of said shape memory polymer. As stated above, as a concrete means for heating to realize easily the joining body which can be decomposed, this invention persons selected shape memory polymer of a polyurethane system, and newly developed the plastic working method for fabricating in still more arbitrary shape. It checked that sufficient secondary size enlargement was possible also with hot forming and a cooling fixing method. Although it is important whether shape recovery characteristic with this material and the mold goods by the combination of this processing method actually sufficient as the third technical problem is shown practically, and decomposition by heating can be performed easily, this is checked by trial production and described in

detail in an example.

[0020]It can realize combining these materials and a processing method, and the typical example of the joining body which has a thermal decomposition function is shown in drawing 1. A figure is what showed the screw thread which consists of polyurethane system shape memory polymer, and the joining body constituted with a metallic nut, and drawing 1 (a) shows the fitting state in a room temperature. The female screw of the male screw which is formed of secondary size enlargement and bears a conclusion function, and a metallic nut has fitted in. If this joining body is heated more than  $T_g$ , a male screw will disappear nearly thoroughly, a nut falls out, and decomposition is completed. This state is shown in drawing 1 (b). This invention is indicated about the manufacturing method of the joining body which has such a thermal decomposition function, and various structures.

[0021]The invention according to claim 4 constitutes a conclusion functional division from said polyurethane system shape memory polymer. Though shape memory polymer is used with this invention of using said polyurethane system shape memory polymer excellent in the characteristic, if it heats more than  $T_g$ , the joining body which can be decomposed easily is realizable.

[0022]Furthermore, in addition to the invention according to claim 4, the invention according to claim 5 carries out secondary size enlargement of the conclusion functional division using hot forming and a cooling fixing method, using either of the methods indicated to said claims 1-3. According to this invention, by heating more than  $T_g$ , a conclusion functional division carries out shape recovery, and since a conclusion function is lost, perfect decomposition is attained. In the joining body which consists of a male form which fits in mutually and suits, and a female form, the invention according to claim 6 makes smaller than the inside diameter of the fitting part a fitting partner's female form joining body the outer diameter in front of the secondary size enlargement of the external threaded section which consists of said shape memory polymer, or ring shape heights. According to this invention, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the outer diameter of an external threaded section or heights smaller than the inside diameter of a fitting part, and it becomes possible to make segregation load into zero.

[0023]In the joining body which similarly consists of a male form which the invention according to claim 7 fits in mutually, and suits, and a female form, The inside diameter in front of the secondary size enlargement of a fitting part called the female screw part or ring shape heights which consists of said shape memory polymer is made larger than the outer diameter of the fitting part a fitting partner's male form joining body. According to this invention, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the inside diameter of the fitting part of a female part article larger than the outer diameter of the fitting part of a male part article, and it becomes possible to make segregation load into zero.

[0024]In the joining body which consists of a male form which the invention according to claim 8 fits in mutually, and suits, and a female form, The inside diameter in front of the secondary size enlargement of a fitting part called the female screw part or ring shape uneven part which consists of said shape memory polymer is made larger than the outer diameter in front of the male screw of a fitting partner's male type, or the secondary size enlargement of a ring shape uneven part. According to this invention, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the inside diameter of the fitting part of a female part article larger than the outer diameter of an external threaded section or an uneven part, and it becomes possible to make segregation load into zero.



[0025]The invention according to claim 9 is a decomposing method decomposing a joining body with external force in the state where it heated more than  $T_g$ . Since according to this invention fastening force will decline remarkably by softening if it is the temperature more than  $T_g$  even when shape recovery is insufficient, decomposition becomes easy. It is preferred to use said polyurethane system shape memory polymer which has the outstanding characteristic as shape memory polymer. Even if it is a joining body of only primary size enlargement, decomposition will become easy if this method is used. Therefore, according to these inventions, it becomes possible to disassemble the simple product moreover constituted by slight tensile force by many joining bodies at a stretch.

[0026]It is as follows when an operation of this invention mentioned above is summarized. According to this invention, it can carry out possible [ of the secondary size enlargement by conventionally difficult cold forming ] by specifying the plastic-working conditions reflecting the material property of polyurethane system shape memory polymer. And by using polyurethane system shape memory polymer according to this invention, It is possible to realize the joining body which can be easily decomposed with heating, and further, by giving the basic constitution of the joining body using the above-mentioned processing method, a conclusion functional division carries out shape recovery with heating, and can realize the joining body which loses fastening force.

[0027]According to this invention, in the concrete joining body which consists of a female part article and a male part article, the fastening structure which loses fastening force with heating is realizable, exhibiting a conclusion function at a room temperature by adjusting the relation between the inside diameter of a female part article, and the outer diameter of a male part article. Even when the shape recovery by heating is still more imperfect according to this invention, heat softening can decompose easily. As mentioned above, by choosing the polyurethane system shape memory polymer which has the outstanding characteristic according to this invention further, As a secondary size enlargement method of said shape memory polymer, the joining body of a thermal decomposition concept is realizable by making cold forming possible in addition to hot forming and a cooling fixing method. By providing the decomposing method by heat softening collectively, low cost and effective decomposition are attained and recycling is considered to become very easy.

[0028]

[Embodiment of the Invention]Hereafter, the suitable embodiment of this invention is described, using a drawing as a concrete example. First, the processing method and manufacturing installation of shape memory polymer concerning the first example of this invention are explained. There is no data of the cold-forming method about the polyurethane system shape memory polymer which this invention persons chose, the experiment and the trial production were actually performed, and the condition was newly found out. As the cold-forming method as a secondary size enlargement method, form rolling was tackled mainly. The raw material used for form rolling is a raw material which has a head as the round bar or screw thread in which a diameter has a shank which is  $\phi 5.2\text{mm}$  mostly, and examined the moldability to the screw thread of M6 class in detail. As a result, the remains distortion amount (plastic deformation irreversible deformation, the amount of permanent deformation) found out that it was greatly dependent on a rolling speed (rate of strain) and working temperature, and drew conditions required for processing to each. First, drawing 2 is the graph which showed clearly that how to stretch a screw-thread outer diameter has a rolling-speed

dependency. Data is based on a flat-dies (board dice) form-rolling board and a circular-screwing-die form-rolling board, and form rolling was performed on standard conditions except having changed the rolling speed. Since a screw thread hardly stands as for a rolling speed (\*\*\*\*\* is the speed of the periphery of \*\*), in order to make a screw thread stand to some extent above 20 cm/sec, it became clear that it must be a rolling speed below 20 cm/sec at least. Especially a desirable rolling speed is 5 cm/sec or less which can secure about 70 percent of the maximum plastic deformation irreversible deformation and from which sufficient fastening force is acquired. Reflecting the material property that deformability changes with rate of strain, by reducing rate of strain, deformability has been improved and this became distinct [ that a moldability improves ] with this material.

[0029]Considering the case where screw-thread size is changed from M6 class, with the metric thread specified to JIS also as screw-thread shape, therefore dice shape. In order that it may not be based on the size of screw-thread size but the shape may show a similar relation mostly (the ratio of a screw-thread outer diameter and the diameter of a raw material becomes about 1.1), rate of strain are mostly determined by revolving speed. Therefore, the rolling-speed conditions mentioned above when the shaft diameter (diameter of blank) of the raw material (blank material) before processing was made into  $d_0$  in consideration of screw-thread size, Below  $20 \times (d_0/5.2)$  cm/sec can rewrite, and, especially as for desirable conditions, below  $5 \times (d_0/5.2)$  cm/sec becomes. Therefore, it is necessary to process it at speed including these conditions for effective processing. It is contained also when holding a rolling speed on these conditions 0.

[0030]Drawing 3 is the graph which changed the rolling speed of drawing 2 into rate of strain. If it considers that the springback of the raw material compressed for the dice is small enough and approximation of 1 axial deformation is applied, rate of strain can be expressed like the following (7) types using a rolling speed and the compression velocity of a die surface (peak parts) to a material shaft center.

[Equation 1]

$$\dot{\epsilon} = \pi \omega \left( -1 + \sqrt{1 + 2\pi \frac{r\omega}{v}} \right)^{-1} \quad (7)$$

〔式中、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 $r\omega$  ( $r$ が素材半径、 $\omega$ が軸回転の角速度)は転造速度、 $v$ は素材軸中心に対するダイス面(山部)の圧縮速度、をそれぞれ示す。〕

This graph shows that plastic working must be performed with the rate of strain below at least  $14\text{-sec}^{-1}$ , in order to make a screw thread stand. Especially desirable conditions are the rate of strains below  $4\text{-sec}^{-1}$  by the same reason as the case of a rolling speed. Therefore, it is necessary to process it at speed including these conditions for effective processing. It is contained also when holding rate of strain on these conditions 0. Here, in the case of flat dies, in the case of the degree of angle of lead in, and the circular screwing die, it calculated about the compression velocity  $\nu$  using the slippage speed of a dice. Thus, once it converts into rate of strain and makes this into an index, the condition can be easily applied also to plastic-working methods other than forming of rolling from which it separated from standard conditions, and also form rolling, and it is dramatically useful. When the rate of strain dependency of the remains distortion amount (plastic deformation irreversible deformation) was confirmed by other plastic-working methods, such as heading and press working of sheet metal, the same tendency as form rolling was actually obtained. Therefore, these conditions are applicable to the general plastic-working method for this material.

[0031]Drawing 4 is the graph which showed an effect of cooling which appears in a screw-thread outer

diameter (moldability of a screw thread). Glass-transition-temperature  $T_g$  of shape memory polymer used for an experiment is 55 \*\*. This graph shows that it is effective to carry out forced cooling to a temperature lower than about at least 10 \*\* or less and a room temperature, in order to make a screw thread stand. In addition to an effect which removes compulsorily generation of heat produced by form rolling, this is considered to be also the result of having decreased spring back quantity using the temperature dependence of spring back quantity produced immediately after plastic deformation. Since it is thought that this shape memory polymer moves almost in parallel [ the temperature dependence of a stress-strain characteristic ] by movement of  $T_g$ , to material of different  $T_g$ , it is necessary to perform cooling not more than  $T_g - (55 - 10) = T_g - 45$  \*\* at least. Especially desirable conditions are below  $T_g - 80$  \*\* which can secure 70 percent of the amount of maximum deformation. This condition is applicable to other plastic-working methods needless to say. Therefore, in order to perform plastic working of this polyurethane system shape memory polymer, while reducing a rolling speed (rate of strain), it turned out that it is very effective to fully cool a raw material.

[0032] Drawing 5 is an explanatory view of a manufacturing installation which realizes this processing method. In drawing 5, although thread rolling by a circular-screwing-die form-rolling board is taken up as a processing method, as a form rolling device, a flat-dies (board dice) form-rolling board, a planetary form-rolling board, or a female screw form-rolling board (tapper) may be sufficient. A circular-screwing-die form-rolling method is a processing method which transfers shape minced by dice by putting the raw material 52 (here round bar material) which consists of shape memory polymer, and pressing a die surface between the two rotating circular screwing dies 51A and 51B. A raw material in a case of processing it into a joining body eventually is produced by casting or injection molding including a head.

[0033] As drawing 2 and drawing 3 showed, already Conditions of claim 1 and claim 2, a jam, In order to realize below 14 sec of rate of strain  $^{-1}$ , and below rolling-speed  $3.8 \times d_0 \text{ cm/sec}$  ( $d_0$  is a diameter of a material shaft), A gearing system must be established using a low-speed type thing as a drive motor, speed must be reduced, and a gearing system is used in consideration of compatibility with high-speed specification here. Although the numerical control of the rotational movement speed of a dice is carried out, especially as a rolling speed (a raw material rolling speed), considering a moldability, a rolling speed below  $0.96 \times d_0 \text{ cm/sec}$  is desirable, and this is a super low speed as compared with a rolling speed of a metal material. However, since a raw material is soft polymer, big torque is not needed.

[0034] 53 is a coolant gas spraying type cooling system, has the capability for cooling temperature conditions (below  $T_g - 45$  \*\*) of claim 3 shown in drawing 4 to be clearable, and can spray the coolant gas 54 of 10 \*\* of minus numbers by adiabatic cooling. The spray nozzle 56 is equipped with the thermo sensor 55, and it can display temperature of a raw material mostly. Here, a fluid may be dropped although gas was used as a coolant. A raw material and a dice may be cooled individually, such as cooling a raw material using same technique near [ 57 ] the feed hopper of a conveyance system, and cooling a dice with cooling devices, such as a Peltier device. In cooling below to a room temperature, in order to prevent dew condensation of a form-rolling board, dry air is passed around a raw material and a dice.

[0035] Here, although a mechanism in which this processing method was realized about a form-rolling board was shown, it can think the same way with a forging header or a press-forming machine. As mentioned above, an example about the first example of this invention and a manufacturing method was described.

[0036]Next, a joining body which consists of shape memory polymer concerning the second example of this invention is explained. First, drawing 6 is a figure showing shape of a male screw produced according to the first example, and glass transition temperature of used polyurethane system shape memory polymer (brand-name diary) is 55 \*\*. Although an axial outer diameter after processing hardly stood with  $\phi 5.26\text{mm}$  to material shaft outer diameter  $\phi 5.24\text{mm}$  in the same form-rolling conditions (rolling speed: 33 cm/[ sec and ], form-rolling temperature:room temperature) as steel screw threads as for a screw thread, As a result of reducing a rolling speed to 1 cm/sec and performing -45 \*\* forced cooling, male screw shape shown in drawing 6 was obtained. It seems that this is probably the first time that shape which has a conclusion function by secondary size enlargement was given to shape memory polymer. Shape recovery was carried out nearly thoroughly as it was shown in a figure, when it held for 1 minute at 70 \*\* and the shape recovery characteristic was checked. Digital data is shown in Table 2.

[0037]

[Table 2]

表 2 形状記憶ポリマーからなる雄ねじの数値データ

	転造前	転造状態	加熱回復後
外径 $\phi$ (mm)	5.25	5.87	5.26

[0038]As mentioned above, not only described cold forming but hot forming and a cooling fixing method were examined collectively. When heating and cooling at 70 \*\* and 20 \*\* were performed using big water of specific heat, snap fitting-like heights (projection) could be formed and shape recovery was carried out nearly thoroughly by heating at 70 \*\* again. However, a thermo cycle which secondary size enlargement took was about 30 seconds. Thus, if a plastic-working method between main cooling, and hot forming and a cooling fixing method are used using this material, a joining body which can realize a thermal decomposition concept is producible.

[0039]A threaded fastener is made into an example and the basic structure is shown in drawing 7. Drawing 7 (a) expresses a change of state that an external threaded section disappears, by heating more than  $T_g$  about a male part article (screw) which consists of shape memory polymer. Here, since it was easy, a case where an external threaded section disappeared was illustrated, but an external threaded section outer diameter may contract actually. Since it extends a shank of a screw thread to shaft orientations rather than the form-rolling forward in producing a screw thread by form rolling, when heating shape recovery is performed, it will be shrunk by shaft orientations.

[0040]Drawing 7 (b) expresses the change of state that a female screw part disappears, by heating more than  $T_g$  about the female part article (nut) which consists of shape memory polymer. Here, since it was easy, the case where a female screw part disappeared was illustrated, but a female screw part inside diameter may be expanded actually.

[0041]Next, (c) - (e) of drawing 7 shows the decomposition state of a joining body where the above-mentioned threaded fastener was used. Drawing 7 (c) corresponds to claim 6, and shows the joining body making smaller than inside diameter  $D_i$  of a fitting partner's female screw part outer diameter  $d_o$  in front of the secondary size enlargement of the external threaded section which consists of said shape memory polymer in the joining body which consists of a male form which fits in mutually and suits, and a female form. When the outer diameter of the external threaded section after secondary size enlargement is

made into  $d_1$ , a formula (1) expresses a decomposing condition and a formula (2) expresses conclusion conditions.

$$d_0 < D_1 \quad (1)$$

$$d_1 > D_1 \quad (2)$$

Therefore, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the outer diameter of an external threaded section smaller than the inside diameter of a female screw part, and it becomes possible to make segregation load into zero. However, since the rate of shape recovery will not be 100% actually, when the outer diameter of the external threaded section after carrying out shape recovery is made into  $d_0'$  ( $>d_0$ ), a formula (1) is  $d_0' < D_1$  (8).

It becomes a little severe conditions. Here, since it was easy, the case where an external threaded section disappeared was illustrated, but an external threaded section outer diameter may contract actually, and a head may contract and disappear.

[0042] Drawing 7 (d) corresponds to claim 7, and shows the joining body making larger than outer diameter  $d_1$  of a fitting partner's external threaded section inside diameter  $D_0$  in front of the secondary size enlargement of the female screw part which consists of said shape memory polymer in the joining body which consists of a male form which fits in mutually and suits, and a female form. When the inside diameter of the female screw part after secondary size enlargement is made into  $D_1$ , a formula (3) expresses a decomposing condition and a formula (4) expresses conclusion conditions.

$$d_1 < D_0 \quad (3)$$

$$d_1 > D_1 \quad (4)$$

Therefore, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the inside diameter of a female screw part larger than the outer diameter of an external threaded section, and it becomes possible to make segregation load into zero. however — since the rate of shape recovery will not be 100% actually, if the inside diameter of the female screw part after carrying out shape recovery is made into  $D_0'$  ( $<D_0$ ) — a formula (3) —  $d_1 < D_0'$  (9)

It becomes a little severe conditions. Here, since it was easy, the case where a female screw part disappeared was illustrated, but a female screw part inside diameter may be expanded actually.

[0043] In the joining body which consists of a male form which drawing 7 (e) corresponds to claim 8, fits in mutually, and suits, and a female form, When the male screw and the female screw are formed of the secondary size enlargement of shape memory polymer, the joining body making the inside diameter in front of the secondary size enlargement of a female screw part larger than the outer diameter in front of the secondary size enlargement of a fitting partner's external threaded section is shown. When an old sign is used, a formula (5) expresses a decomposing condition and a formula (6) expresses conclusion conditions.

$$d_0 < D_0 \quad (5)$$

$$d_1 > D_1 \quad (6)$$

Therefore, by heating more than  $T_g$ , it becomes possible to make the inside diameter of a female screw part larger than the outer diameter of an external threaded section, and it becomes possible to make segregation load into zero. At this time, the conditions which consist of the formula (5) and (6) become looser than the conditions of claims 6 and 7. However, actually, the rate of shape recovery is  $d_0' < D_0'$  (10), when the diameter of inside and outside after shape recovery is used, since it does not become 100%.

It becomes severe a little from a next door and a formula (5). Here, since it was easy, the case where an external threaded section and a female screw part disappeared was illustrated, but an external threaded section outer diameter may contract actually, a head may contract and disappear, or a female screw part inside diameter may be expanded.

[0044]Such a manufacturing method of an external threaded section and a female screw part is based on plastic working. Specifically, they are form rolling, forging, and press forming. In the case of form rolling, that of form rolling and the female screw with which the male screw used rolled dies should just perform form rolling which used the plastic-working type rolled tap like the usual metal goods. When the outer diameter of an external threaded section contracts and the inside diameter of a female screw part is expanded, a thread part can also be fabricated by cutting. When the inside diameter of a female screw part is expanded, a female screw part may be fabricated with a tapping screw.

[0045]Since in the case of heading the raw material itself will try to spread in a diameter direction if a raw material is compressed into shaft orientations, a male screw is fabricated with a rate dice. Since it is going to contract to an inner diameter direction if a raw material is compressed into shaft orientations, where the dice in which the male screw is formed is inserted, a raw material is compressed into shaft orientations, and a female screw is fabricated in a female screw. Or where the dice in which the male screw is formed in the raw material is inserted, when an inside diameter presses fit in tapered shape into the dice which is narrow, it compresses into the diameter direction of a raw material, and a female screw is fabricated.

[0046]In a press, the rate dice in which female screw shape was formed is pressed against a diameter direction, and a male screw is fabricated. What is necessary is in the case of a female screw, just to compress simply in a diameter direction, where the dice in which the male screw is formed in the raw material is inserted. In forging and a press, the dice which was inserted in the hole for female screw shaping and in which the male screw is formed, If what is necessary is just to draw out after female screw shaping, rotating either a female screw or a dice and it is made the rate dice, it will also become possible by changing how to construct a dice and reducing the outer diameter of the whole rate dice to draw out a dice simply.

[0047]Of course besides the method described concretely here, the forming process by hot forming and cooling immobilization may be used. According to a formula (1) and (6), by making the outer diameter before form rolling of a male screw smaller 0.1 mm than the inside diameter of a nut section article actually shows the data of the joining body which realized the thermal decomposition concept to drawing 8. the stud to which the produced joining body has an external threaded section on both sides — it is a screw thread of a type and the metallic nut was used for the fitting partner. Drawing 8 (b) is an imaged figure of the decomposition examination which did the tensile test in the thermostat, and drawing 8 (a) is a test result. What pulled the screw thread of a form-rolling state at the room temperature was fractured not by a shank but by the thread part like the usual metal screw thread, and it was shown that the intensity of the screw thread itself is high as shown in drawing 8 (b). The maximum tensile load at that time showed 119.1kgf and sufficient value. If this value is converted into a stress display using a stress area, it will be set to 58MPa, but this is larger than the value (47 – 51MPa) which hard vinyl chloride (PVC) shows, and equivalent to the value (54 – 60 MPa) which polycarbonate (PC) shows. That is, it has checked having intensity sufficient as a polymer screw thread (plastic screw thread). Next, when it was going to check a room temperature and the decomposition mode in  $T_g+20$  \*\* after shape recovery at  $T_g+20$  \*\*, the male screw disappeared in the middle

of heating, and the metallic nut was omitted with gravity and it decomposed.

[0048] If full use of the newly developed processing method is made and conditions relevant between the outer diameter of a male screw, and the outer diameter after shape recovery and a minor diameter of nut are set up using polyurethane system shape memory polymer as mentioned above, it will become possible to realize a joining body like drawing 1 which has a thermal decomposition function. In this example, the joining body which has a thermal decomposition function similarly in the combination of a male screw, a simple external threaded section article which is called a nut, and which have other functions although it combined and came out, and a female screw part article is obtained.

[0049] Next, the joining body of shape memory polymer concerning the third example of this invention is explained. The second example is related with what is called a threaded fastener, and takes up joining bodies, such as the other snap fitting, to drawing 9 as the third example. It is the structure corresponding to [ corresponding to / corresponding to claim 6 in drawing 9 (a) / claim 7 in drawing 9 (b) ] claim 8 in drawing 9 (c). The conditions about an inside diameter and an outer diameter and a manufacturing method are the same as that of the case of the second example. Although not clearly shown in a figure, the outer diameter of a conclusion function part may contract about a male form joining body, and the inside diameter of a conclusion function part or a fitting part may be expanded about a female form joining body. That the inside diameter of a fitting part is expanded refers to the case where the inside diameter of a fitting partner's pipe shape female part article expands and decomposes to the snap fitting of the shape for example, of 91e. In drawing 9, since it is easy, while only section structure is shown, the fastener is omitted like drawing 7.

[0050] The decomposing method of the joining body which becomes the last from shape memory polymer concerning the fourth example of this invention is explained. This invention is the technique of being related with the decomposing method indicated to claim 9, heating the joining body which consists of shape memory polymer more than  $T_g$ , making it soften, and decomposing easily by reducing segregation load. The example is shown in drawing 10. An external threaded section article consists of shape memory polymer, and a female screw part article is metal. Except the point which made the inside diameter of the nut section article smaller 0.1 mm than the outer diameter before form rolling of a male screw, it is the same as that of drawing 8 of the second example. At this time, even if the outer diameter in front of the secondary size enlargement of an external threaded section is larger than the inside diameter of a female screw part and it heats more than  $T_g$ , the automatic decomposition by gravity does not take place. However, since it softens rapidly, in the temperature conditions more than  $T_g$ , it becomes possible to decompose with minute external force. Although the maximum tensile load in a form-rolling state was 119.2kgf, when pulled heating at  $T_g+20$  \*\*, it was actually able to be decomposed by the power of small 0.8kgf. Therefore, if assuming minute external force when decomposing is permitted, there is no necessity of carrying out shape recovery thoroughly with heating, shape with the primary size enlargement which does not perform secondary size enlargement may be sufficient, and a conclusion function part may be further fabricated by cutting. The joining body of various structures can be decomposed at once with slight external force, without receiving most restrictions of shape according to this decomposing method. The structure of the target plastic joining body is shown in drawing 11 and drawing 12. The joining body of Examples 2 and 3 is also the target of a duty solution on the character of a duty solution. Although these joining bodies support either of claims 4-8, since restriction of the necessity for secondary size enlargement, the shape recovery characteristic, etc.

may be eased, by the duty solution method, you may not be shape memory polymer in particular of a polyurethane system.

[0051]

[Effect of the Invention]According to this invention, the conventionally difficult cold-forming method was made possible with the plastic working method reflecting the material property of polyurethane system shape memory polymer. By this, it becomes possible with a volume production level, and has complicated shape, and it can be cheap and the secondary size enlargement of polyurethane system shape memory polymer can supply now the high shape memory polymer products of added value, such as having the heating shape recovery characteristic, in large quantities. According to this invention, though it becomes possible to manufacture the product which recovers shape with heating, especially a joining body and has fastening force sufficient at a room temperature by this, the utilization of a joining body which loses fastening force above glass-transition-temperature  $T_g$  is attained. Furthermore, according to this invention, even when the shape recovery by heating of a joining body which has said thermal decomposition function is imperfect, heat softening can decompose easily.

[0052]Since it becomes possible to also disassemble easily the product conventionally disassembled by crushing by these, the recycling which does not do damage to parts is attained. Since it becomes possible to reduce a worker's burden and to improve safety and becomes possible to reduce substantially the time which decomposition and recycling take, it can contribute also to cost reduction greatly. For this reason, arrival of the recycle-orientation which should come is accelerable.

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1]It is a key map of the joining body which has a thermal decomposition function which consists of shape memory polymer.

[Drawing 2]It is a characteristic figure showing the rolling-speed dependency of a screw-thread outer diameter.

[Drawing 3]It is a characteristic figure showing the rate of strain dependency of a screw-thread outer diameter.

[Drawing 4]It is a characteristic figure showing the form-rolling temperature dependence of a screw-thread outer diameter.

[Drawing 5]It is an explanatory view of the manufacturing installation concerning the first example of this invention.

[Drawing 6]It is an explanatory view showing the shape of the male screw concerning the second example of this invention, and the shape after heating shape recovery.

[Drawing 7]Are thermal decomposition of the joining body (threaded fastener) concerning the second example of this invention a shown explanatory view, and (a), The explanatory view showing the heating shape recovery of an external threaded section article and (b), The explanatory view showing decomposition according [ the explanatory view showing decomposition according / the explanatory view showing the heating shape recovery of a female screw part article and (c) / to the heating shape recovery of an external threaded section article and (d) ] to the heating shape recovery of a female screw part article and (e) are the explanatory views showing decomposition by the heating shape recovery of an external threaded section article and a female screw part article.



[Drawing 8] It is a chart showing maintenance/thermal decomposition characteristic of the joining body which consists of shape memory polymer concerning the second example of this invention, and the table in which (a) shows a test result, and (b) are examination imaged figures.

[Drawing 9] Are the structure of a joining body and thermal decomposition concerning the third example of this invention a shown explanatory view, and (a), The explanatory view showing decomposition according [ the explanatory view showing decomposition by the heating shape recovery of a male part article and (b) ] to the heating shape recovery of a female part article and (c) are the explanatory views showing decomposition by the heating shape recovery of a male part article and a female part article.

[Drawing 10] It is a chart showing maintenance/thermal decomposition characteristic of the joining body which applied the decomposition technique concerning the fourth example of this invention.

[Drawing 11] It is a perspective view of the joining body concerning the fourth example of this invention, and (a) is a perspective view of an external threaded section article, and (b) is a perspective view of a female screw part article.

[Drawing 12] It is a perspective view of the joining body concerning the fourth example of this invention, and is a perspective view of a fastener part.

[Description of Notations]

11 The screw thread which consists of shape memory polymer

12 The screw thread by secondary size enlargement

13 The thread part which carried out shape recovery and disappeared

14 Nut

51A, 51B circular screwing die

52 Form-rolling raw material

53 Cooling system

54 Coolant gas

55 Thermo sensor

56 Spray nozzle

57 Conveyance system

71a-71h screw thread

72a-72h Nut

91a-91n Male part article

91a-92n Female part article

The screw threads which consist of 111a-111l shape memory polymer

The nuts which consist of 112a - 112e shape memory polymer

The fasteners which consist of 113a - 113x shape memory polymer

[Translation done.]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2003-145564  
(P2003-145564A)

(43)公開日 平成15年 5月20日 (2003. 5. 20)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード <sup>*</sup> (参考)
B 2 9 C 43/02		B 2 9 C 43/02	3 J 0 3 6
F 1 6 B 19/00		F 1 6 B 19/00	A 4 F 2 0 4
	35/00	35/00	J
// B 2 1 J 15/00		B 2 1 J 15/00	Z
B 2 9 L 1:00		B 2 9 L 1:00	
審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 12 頁)			

(21)出願番号 特願2001-342305(P2001-342305)

(22)出願日 平成13年11月 7日 (2001. 11. 7)

(71)出願人 000006208

三菱重工業株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目 5 番 1 号

(71)出願人 592118103

メイラ株式会社

愛知県名古屋市中村区椿町17番15号

(72)発明者 林 俊一

愛知県名古屋市中村区岩塚町字高道 1 番地

三菱重工業株式会社名古屋研究所内

(74)代理人 100099623

弁理士 奥山 尚一 (外 2 名)

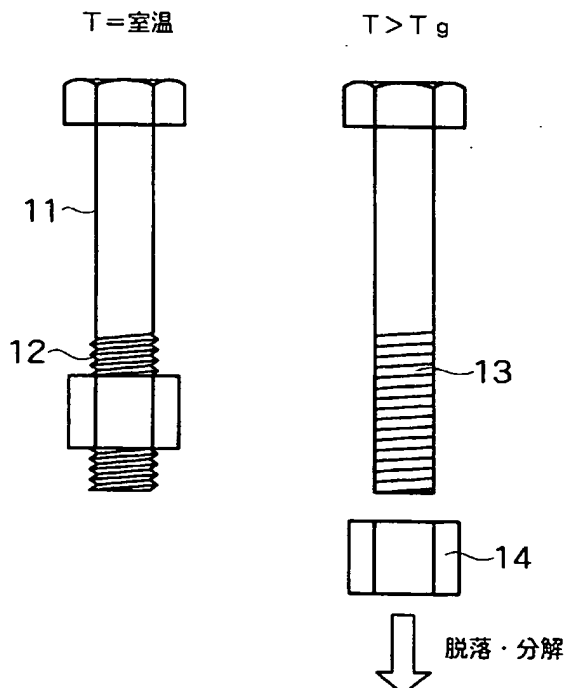
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 形状記憶ポリマーの塑性加工方法および締結体

(57)【要約】

【課題】 通常の使用温度では十分な締結力を持ちながらも、加熱することにより締結力を失う締結体を実現し、これにより、短時間で大量の解体・分解を可能にし、低コスト、高効率なリサイクルを容易にする。

【解決手段】 形状記憶ポリマーからなる締結体において、締結機能を発揮する部位を二次賦形によって成形する。この締結部の二次賦形前の原形を締結機能を持たない形に一次賦形しておけば、ガラス転移温度以上に加熱することにより、締結体は締結力を失い容易に分解できる。二次賦形方法としては、冷間塑性加工あるいは加熱成形・冷却固定法を用いる。また、形状記憶ポリマーとしては、形状回復率が大きく、ガラス転移温度を室温より十分高い領域で調節できるものが必須であり、ポリウレタン系の形状記憶ポリマーを選択した。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 ポリウレタン系形状記憶ポリマーの塑性加工において、 $1.4 \text{ sec}^{-1}$ 以下の歪み速度を用いることを特徴とする形状記憶ポリマーの塑性加工方法。

【請求項2】 転造加工を含む塑性加工において、加工前の素材径を $d_0$ としたときに軸回転の周速に関して $3.8 \times d_0 \text{ cm/sec}$ 以下の周速を用いることを特徴とする請求項1記載の形状記憶ポリマーの塑性加工方法。

【請求項3】 ポリウレタン系形状記憶ポリマーの塑性加工において、該ポリマーのガラス転移温度を $T_g$ としたときに、 $T_g - 45^\circ\text{C}$ 以下に該ポリマーを冷却することを特徴とする請求項1又は2に記載の形状記憶ポリマーの塑性加工方法。

【請求項4】 形状記憶ポリマーからなる締結体において、一部または全部がポリウレタン系形状記憶ポリマーからなる締結体であって、該ポリウレタン系形状記憶ポリマー部分に、締結機能を発揮する、凸部、凹部、凹凸部、ねじ部、および、傾斜部からなる群より選ばれる少なくとも1つ以上の形状を有することを特徴とする締結体。

【請求項5】 前記締結機能を発揮する部位の一部あるいは全部が、請求項1～3のいずれかに記載の加工方法、または、加熱成形・冷却固定法を用いて二次賦形されたことを特徴とする請求項4記載の締結体。

【請求項6】 請求項5記載の締結体において、ポリウレタン系形状記憶ポリマーからなる締結機能部を有し、該締結機能部における外径を $d_1$ 、二次賦形前の外径を $d_0$ とし、嵌合相手となる雌形締結体の締結機能部、あるいは嵌合部の内径を $D_1$ としたときに、下式(1)及び(2)

$$d_0 < D_1 \quad (1)$$

$$d_1 > D_1 \quad (2)$$

を同時に満たすように、該締結機能部を請求項1～3のいずれかに記載の加工方法、または、加熱成形・冷却固定法を用いて作製することを特徴とする雄形の締結体。

【請求項7】 請求項5記載の締結体において、ポリウレタン系形状記憶ポリマーからなる締結機能部を有し、該締結機能部における内径を $D_1$ 、二次賦形前の内径を $D_0$ とし、嵌合相手となる雌形締結体の締結機能部、あるいは嵌合部の外径を $d_1$ としたときに、

$$d_1 < D_0 \quad (3)$$

$$d_1 > D_1 \quad (4)$$

を同時に満たすように、該締結機能部を請求項1～3のいずれかに記載の加工方法、または、加熱成形・冷却固定法を用いて作製することを特徴とする雌形の締結体。

【請求項8】 請求項5記載の締結体において、ポリウレタン系形状記憶ポリマーからなる締結機能部を有し、該締結機能部における外径を $d_1$ 、二次賦形前の外径を $d_0$ とし、嵌合相手となる雌形締結体のポリウレタン系形状記憶ポリマーからなる締結機能部、あるいは嵌合部

の内径を $D_1$ 、二次賦形前の内径を $D_0$ としたときに、

$$d_0 < D_0 \quad (5)$$

$$d_1 > D_1 \quad (6)$$

を同時に満たすように、雄形締結体の締結機能部および雌形締結体の締結機能部、または嵌合部を、請求項1～3のいずれかに記載の加工方法、もしくは、加熱成形・冷却固定法を用いて作製することを特徴とする雄形および雌形の締結体。

【請求項9】 形状記憶ポリマーからなる締結体において、締結機能を発揮する、凸部、凹部、凹凸部、ねじ部、および、傾斜部からなる群より選ばれる少なくとも1つ以上の形状を有し、該締結機能部をガラス転移温度 $T_g$ 以上に加熱して軟化させ、締結体の分離荷重を低減した状態で締結体の分解を行う分解方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、部品を本体に組み付けたり、部材同士を結合させたりするなど、物と物との締結を行う締結部品、特にねじ、ボルト、ナット、リベット、クリップ、クランプ、スナップフィット等のファスナー、などの締結体類に関する。

## 【0002】

【従来の技術】電子機器、家電製品をはじめとする電化製品、機械製品等は多くの部品から成り立ち、ねじやリベットを始めとする多くの締結部品で組み立てられている。ところが、これら製品を分解・リサイクルして資源を有効利用するためには、分解コストが大きな問題となっている。形状記憶材料（合金およびポリマーなど）からなる締結体を用いれば、ある温度を境に形状を変化させ、締結力を無くすことも原理的には可能となるので、分解・リサイクルと前提とした製品の締結体としては非常に優れている。よって、このような加熱分解コンセプトに基く締結体の実現が待望されていた。

【0003】形状記憶材料を用いた締結体としては、加熱形状回復特性を用いて締結を行う締付ピンへの応用が、合金、ポリマーとも既に掲載されている（入江正浩監修：「形状記憶ポリマーの材料開発」、CMC、p.25、1989.）。さらには、同様な特性を利用して締結とは逆の分解機能を実現する締結体に関しても、基本的な提案は既に開示されている（例えば、特開平7-4407）。しかし、このような締結力に温度依存性を持たせた締結体に関しては、基本的な提案こそなされてはいるものの、未だに実用化はなされていない。これは、合金であれ、ポリマーであれ、従来試作が行われてきた材料では、その形状回復特性が小さかったり、加工（二次賦形あるいは二次成形）が難しかったからである。したがって、十分な成形性と形状回復特性とを有する材料を見出すことが実用化へ向けての第1ステップとなり、最終的にはコスト評価も必要となる。

【0004】この材料選択に関して、合金とポリマーを

10

20

30

40

50

比較した場合、形状回復特性はポリマーの方が圧倒的に大きい。合金ではその値は通常10%に満たないが、ポリマーでは100%を超えるものも存在する。また、コスト的にも圧倒的に有利である。代表的な形状記憶合金であるTi-Ni系合金が数十万円/kgなのに対して、形状記憶ポリマーは概ね5000円/kgと安い。このように形状記憶ポリマーは、形状回復特性に優れているため設計の自由度が大きく、低コストであるため現行の締結体を置き換える場合にも圧倒的に有利である。したがって、本発明者らはかかる理由から材料としては形状記憶ポリマーを選択し、締結体への適用を検討した。上記したように材料的に優れた形状記憶ポリマーではあるが、加工（2次賦形）技術に関しては、実用上大きな問題が存在していた。

【0005】形状記憶ポリマーの成形法は、一般に射出成形、押出し成形、注型成形、ブロー成形等であり、これらの手法により所望の形状を成形・記憶することができる（1次賦形あるいは1次成形）。この状態から変形を行うためには、ガラス転移温度 $T_g$ 以上に加熱し、ポリマーをゴム領域に遷移させる。一旦ゴム状態にしてやれば、容易に変形させることが可能となり、変形状態を保ったまま $T_g$ 以下に冷却すれば、その形状を固定化することができる。通常はこのようにして1次賦形した形状に対して新たな形状を付与している（2次賦形あるいは2次成形）。2次賦形後の成形品は、一時的に強制固定されている可逆相（ソフトセグメント）によりその変形状態が保たれているだけなので、再び $T_g$ 以上に加熱してやれば、ゴム状態になり記憶形状（1次賦形の形状）を回復させることができる。

【0006】ところが、加熱後に塑性変形を施し、冷却によって形状を固定するこの2次賦形法（加熱成形・冷却固定法）は、昇温・降温のヒートサイクルを必要とするために時間がかかり、生産性が低く、コストもかかる方法であり、量産には用いられていなかった。そこで本発明者らは、生産性は劣るものの成形精度が比較的高い加熱成形・冷却固定という手法に加えて、ポリマーに対しては従来ほとんど試みられていなかった生産性の高い冷間塑性加工法を、2次賦形法として検討するに至った。しかし、形状記憶ポリマーは粘弾性体であるために金属に比べて塑性変形能が小さく、また変形によって容易に白化・脆化を起こすために冷間塑性加工自体、非常に困難を伴う手法であることが予想され、事実、その通りであった。具体的には代表的な塑性加工方法であるプレス加工、圧造加工、転造加工を実際に試みたが、金属で従来用いられてきた条件では十分な変形量を得ることができなかった。

【0007】塑性加工が難しいことを具体的に説明するために、一例として転造加工法を取り上げる。この成形法は、転造素材を複数（通常2つ）のダイスの間で転がすことによってダイスに刻まれた形状を転写する方法で

あり、代表的な締結体であるねじ製造に用いられている。この転造法は転造速度がひとつの指標になっており、金属ねじの場合、平ダイス（板ダイス）転造盤による生産速度（ダイスのストローク速度に相当）は通常100～400本/分程度である。このように高速で転造を行うのは、生産性を確保するためでもあるが、高速転造の方が表面が平滑になるとも言われている。また、低速転造は、フライホイールの慣性を利用できないのでモーターに大きな負荷がかかってしまい、構造上好ましくない。このときの素材の転造速度（素材転がりの外周の速度）は、JISによるM6クラスのねじでは、20～80cm/sec程度のスピードとなっている。

【0008】ポリマーの転造に関しては、報告例が非常に少ないが、例えば、ポリプロピレンでは、あまりにも低速ではねじ山が立たず、望ましくは20cm/sec程度以上の転造速度が必要である（齊当健一：「プラスチックねじの現状と研究の動向」、日本ねじ研究協会誌、22巻、12号、p.385、1991.）。これは、塑性変形能に転造速度依存性があることを示唆するものであり、転造速度を下げていくと塑性変形しにくくなるという材料特性を示しているものと思われる。また、それ以下の低速転造では、ねじ山が立たないことはもちろん、転造時に滑りが生じてしまい、転造成形そのものができなくなってしまうという機構上の問題点も指摘されている。したがって、ポリマーを転造する場合には、転造速度に下限がある可能性を考慮しなければならない。

【0009】一方、高速転造では、変形熱・摩擦熱によって素材温度が上昇してしまうので、発熱の問題も考慮しなければならない。このような発熱による温度上昇はポリマーにとっては金属よりも影響が大きいはずであり、発熱を抑えるためにも転造速度はある程度遅い方が望ましいと思われる。というのは、ポリマーでは熱伝導率が金属よりも低いために熱が拡散しにくく、さらに温度上昇により材料特性が大きく変化してしまうからである。特に熱可塑性樹脂である形状記憶ポリマーの場合には、素材がガラス転移温度 $T_g$ 以上に昇温してしまうと、転造時に一旦成形されたねじ山が転造ダイスから離脱直後に形状回復してしまい、ねじ山が十分に立たない可能性が予想され得る。

【0010】以上の検討に基き、ねじ外径の転造速度依存性を測定したところ、前記報告に記載されたポリプロピレンにおける望ましい転造速度（20～50cm/sec程度）であってもねじ山はほとんど立たなかった。なお、この実験で用いた形状記憶ポリマーはポリウレタン系のものであり、ガラス転移温度は55℃と室温よりも十分に高いものを選んだ。また、発熱を考慮して冷却を行った。この転造における実例が示す通り、形状記憶ポリマーを塑性加工するためには、金属とは異なる効果を考慮しなければならない、当然ながら金属とは加工条件も異なる。さらに、報告例があるポリマーの加工条件を直接適用する

こともできなかった。このように従来技術では、形状記憶ポリマーに効率よく二次賦形を施すことができず、結果として、加熱分解機能を有する締結体を形状記憶ポリマーで実用化することはできなかった。

#### 【0011】

【発明が解決しようとする課題】以上述べてきたように、ある温度を境に形状を回復する形状記憶材料を用いて、締結力に温度依存性を持たせた締結体に関しては、形状回復特性、コスト、成形法、全ての点でそれを実用化し得る具体的な材料が未だ明らかになっておらず、形状回復度、材料コストの点で形状記憶ポリマーを選んで生産性の高い二次賦形方法はなかった。したがって、室温で十分な締結力を持ちながらも、ガラス転移温度 $T_g$ 以上で締結力を失う締結体は未だ実現されておらず、量産はもちろんのこと、上記分解機能を有する締結体の実現そのものが大きな課題であった。

【0012】本発明はこのような課題を解決するためになされたもので、室温では十分な締結力を持ちながらも、ガラス転移温度 $T_g$ 以上で締結力を失う締結体の実現を目的にしている。具体的にはこのような締結体に適した形状記憶ポリマーを選定・開発するとともに、二次賦形法として加熱成形・冷却固定法を適用したり、冷間塑性加工方法を新たに開発することである。さらには、これら材料や加工方法を用いて現実的な締結部品および分

表1 主な形状記憶ポリマーの形状回復温度（ガラス転移温度 $T_g$ ）

材料	ポリウレタン系（ダイアリイ）	スチレン-ブタジエン系	トランスポリイソプレン系	ポリノルボルネン系
形状回復温度（℃）	-30～120	60～90	67	35

（主に、東レリサーチセンター編：「形状記憶ポリマーの新しい応用展開」による。）

【0015】第二の課題、すなわち、この材料の塑性加工方法に関しては、実際に実験・試作を行い、その条件を新たに見出した。二次賦形法としては、転造をメインに用い、直径 $\Phi 5.2\text{mm}$ の丸棒素材を用いてM6クラスのねじへの成形性を詳細に検討した。結果として、塑性変形量は、転造速度（歪み速度）と加工温度に大きく依存していることを見出し、それぞれに対して加工に必要な条件を導き出した。以下、課題を解決するための手段をその作用とともに記述する。

【0016】図2は、ねじ外径の張り方に転造速度依存性があることを明らかにしたグラフである。実施例での説明の通り、ねじ山を立たせるためには、少なくとも転造速度が20 cm/sec以下でなければならず、特に好ましい転造速度は、成形性から5 cm/sec以下である。なお、ねじサイズをM6クラスから変更した場合を考えると、実施例での説明の通り、加工前の素材軸外径を $d_0$ とすると、上述した転造速度条件は、 $20 \times (d_0 / 5.2)$  cm/sec以下と書き換えることができる。また、特に好ましい条件は、 $5 \times (d_0 / 5.2)$  cm/sec以下となる。

【0017】図3は、転造における応力-歪み特性に一

解方法を提供することである。後者に関しては、さらに次のような課題が考えられる。例えば、形状回復特性が不完全な場合には、加熱しただけでは分解は達成されないで、そのような場合でも分解を実現する手法も必要となることが予想される。

#### 【0013】

【課題を解決するための手段】以上述べてきた課題を解決し、本発明の目的とするところを達成するために、本発明においては加熱によって容易に分解が可能な締結体というコンセプトを実現し得る材料の選定・開発を第一に行った。本発明者らが選定した形状記憶ポリマーは、ポリウレタン系形状記憶ポリマー（三菱重工業（株）開発、商標名ダイアリイ）である。400%もの形状回復特性を有し、材料コストも3000円/kg程度と安い。また、表1に示す通り、形状回復温度（ガラス転移温度 $T_g$ ）の範囲が他の形状記憶ポリマーに比べて広いので、分解温度を設定する際の自由度が大きく、異なる $T_g$ を持つ締結体を用いれば、分解温度を段階的に上げることによって選択的な分解も可能になる。また、高温側までその範囲が伸びているため、製品の通常の使用温度と分解温度との差を大きく取ることができ、誤分解の危険性を極力小さくすることができる。

#### 【0014】

##### 【表1】

軸近似を適用して、図2の転造速度を歪み速度に変換したグラフである。実施例での説明の通り、少なくとも14 sec<sup>-1</sup>以下の歪み速度で塑性加工を行わなければならず、特に好ましい条件は、成形性から4 sec<sup>-1</sup>以下の歪み速度である。したがって、請求項1記載の発明は、本形状記憶ポリマーの塑性加工法において、上記歪み速度の条件を設定することによって、塑性加工の実現を図ったものである。

【0018】また、請求項2記載の発明は、前記形状記憶ポリマーの転造加工法において、転造速度の条件を設定することによって、転造加工の実現を図ったものである。本条件は雄ねじ部品ばかりではなく、ナットなどの雌ねじ部品に関しても同様に成り立つ。図4は、ねじ外径（ねじ山の成形性）に現れる冷却の効果を示したグラフである。実施例での説明の通り、ねじ山を立たせるためには、少なくとも $T_g - (55 - 10)$ ℃以下の冷却が必要になり、特に好ましい条件は、成形性から $T_g - 80$ ℃以下である。

【0019】したがって、請求項3記載の発明は、前記形状記憶ポリマーの塑性加工法において、上記冷却温度

の条件を設定することによって、塑性加工の実現を図ったものである。以上述べてきたように、本発明者らは、加熱によって容易に分解が可能な締結体を実現するための具体的な手段として、ポリウレタン系の形状記憶ポリマーを選定し、さらに、任意の形状に成形するための塑性加工方法を新たに開発した。また、加熱成形・冷却固定法によっても十分な二次賦形が可能であることを確認した。実用上は、第三の課題として、本材料および本加工方法の組合わせによる成形品が実際に十分な形状回復特性を示し、加熱による分解が容易に行えるかどうかが重要であるが、これは試作によって確認しており、実施例の中で詳しく述べる。

【0020】これら材料、加工方法を組合わせて実現でき、加熱分解機能を有する締結体の典型的な例を図1に示す。図はポリウレタン系形状記憶ポリマーからなるねじと金属ナットによって構成される締結体を示したもので、図1(a)は室温における嵌合状態を示したものである。二次賦形によって形成され締結機能を担う雄ねじと金属ナットの雌ねじが嵌合している。この締結体を $T_g$ 以上に加熱すると雄ねじがほぼ完全に消滅し、ナットが脱落して分解が完了する。この状態を図1(b)に示す。本発明は、このような加熱分解機能を有する締結体の作製方法と様々な構造について開示していく。

【0021】請求項4記載の発明は、締結機能部分を前記ポリウレタン系形状記憶ポリマーから構成することを特徴とするものである。特性に優れた前記ポリウレタン系形状記憶ポリマーを用いるという本発明によって、形状記憶ポリマーを用いながらも $T_g$ 以上に加熱すると容易に分解できる締結体を実現することができる。

【0022】さらに請求項5記載の発明は、請求項4記載の発明に加えて締結機能部分を前記請求項1から3に記載された方法のいずれかを用いて、あるいは加熱成形・冷却固定法を用いて二次賦形することを特徴とするものである。本発明によれば、 $T_g$ 以上に加熱することによって、締結機能部分が形状回復し、締結機能を失うので完全な分解が可能となる。さらに、請求項6記載の発明は、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、前記形状記憶ポリマーからなる雄ねじ部あるいはリング状凸部の二次賦形前の外径を嵌合相手の雌形締結体の嵌合部位の内径よりも小さくすることを特徴とするものである。本発明によれば、 $T_g$ 以上に加熱することによって、雄ねじ部あるいは凸部の外径を嵌合部位の内径よりも小さくすることが可能となり、分離荷重を零にすることが可能となる。

【0023】同様に、請求項7記載の発明は、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、前記形状記憶ポリマーからなる雌ねじ部あるいはリング状凸部といった嵌合部位の二次賦形前の内径を嵌合相手の雄形締結体の嵌合部位の外径よりも大きくすることを特徴とするものである。本発明によれば、 $T_g$ 以上に加熱すること

によって、雌形部品の嵌合部位の内径を雄形部品の嵌合部位の外径よりも大きくすることが可能となり、分離荷重を零にすることが可能となる。

【0024】さらに、請求項8記載の発明は、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、前記形状記憶ポリマーからなる雌ねじ部あるいはリング状凹凸部といった嵌合部位の二次賦形前の内径を嵌合相手の雄形の雄ねじあるいはリング状凹凸部の二次賦形前の外径よりも大きくすることを特徴とするものである。本発明によれば、 $T_g$ 以上に加熱することによって、雌形部品の嵌合部位の内径を雄ねじ部あるいは凹凸部の外径よりも大きくすることが可能となり、分離荷重を零にすることが可能となる。

【0025】また、請求項9記載の発明は、 $T_g$ 以上に加熱した状態で外力によって締結体を分解することを特徴とする分解方法である。本発明によれば、形状回復が不十分な場合でも、 $T_g$ 以上の温度であれば、軟化によって締結力が著しく低下するので、分解が容易になる。形状記憶ポリマーとしては優れた特性を有する前記ポリウレタン系形状記憶ポリマーを用いることが好ましい。さらには、1次賦形のための締結体であっても、この方法を用いれば分解が容易になる。したがって、これら発明によれば、単純な、しかもわずかな引張力によって多くの締結体によって構成されている製品を一気に分解することが可能となる。

【0026】前述した本発明の作用をまとめると以下のようになる。本発明によれば、ポリウレタン系形状記憶ポリマーの材料特性を反映した塑性加工条件を指定することにより、従来困難であった冷間塑性加工による2次賦形を可能できる。そして本発明によれば、ポリウレタン系形状記憶ポリマーを用いることによって、加熱によって容易に分解できる締結体を実現することが可能であり、さらに、上記加工方法を用いた締結体の基本構成を与えることにより、締結機能部分が加熱によって形状回復し、締結力を失う締結体を実現できる。

【0027】また、本発明によれば、雌部品と雄部品からなる具体的な締結体において、雌部品の内径と雄部品の外径との関係を調節することにより、室温では締結機能を発揮しながら、加熱によって締結力を失う締結構造を実現できる。さらに本発明によれば、加熱による形状回復が不完全な場合でも、加熱軟化により容易に分解を行うことができる。以上、本発明によると、優れた特性を有するポリウレタン系形状記憶ポリマーを選択することにより、さらには、前記形状記憶ポリマーの二次賦形法として、加熱成形・冷却固定法以外に冷間塑性加工を可能とすることにより、加熱分解コンセプトの締結体を実現することができる。さらには、加熱軟化による分解方法も併せて提供することにより、低コストかつ効果的な分解が可能となり、リサイクルが極めて容易になるものと考えられる。

## 【0028】

【発明の実施の形態】以下、本発明の好適な実施の形態を、具体的な実施例として図面を用いて説明する。まず、本発明の第一の実施例に係わる形状記憶ポリマーの加工方法および製造装置を説明する。本発明者らが選択したポリウレタン系形状記憶ポリマーに関しては冷間塑性加工方法のデータがなく、実際に実験・試作を行い、その条件を新たに見出した。二次賦形法としての冷間塑性加工方法としては、転造をメインに取組んだ。転造に用いた素材は直径がほぼΦ5.2mmの軸部をもつ丸棒もしくはねじとしての頭部を有する素材であり、M6クラスのねじへの成形性を詳細に検討した。結果として、残留歪み量（塑性変形量、永久変形量）は、転造速度（歪み速度）と加工温度に大きく依存していることを見出し、それぞれに対して加工に必要な条件を導き出した。まず、図2は、ねじ外径の張り方に転造速度依存性があることを明らかにしたグラフである。データは平ダイス（板ダイス）転造盤、丸ダイス転造盤によるものであり、転造速度を変えた以外は標準的な条件で転造を行った。転造速度（素材転がりの外周の速度）が20 cm/sec以上では、ねじ山がほとんど立っていないので、ある程度ねじ山を立たせるためには、少なくとも20 cm/sec以下の転造速度でなければならないことが明らかとなった。また、特に好ましい転造速度は、最大塑性変形量のおよそ7割を確保でき、十分な締結力が得られる5 cm/sec以下

$$\dot{\epsilon} = \pi \omega \left( -1 + \sqrt{1 + 2\pi \frac{r\omega}{v}} \right)^{-1}$$

（式中、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 $r\omega$ （ $r$ が素材半径、 $\omega$ が軸回転の角速度）は転造速度、 $v$ は素材軸中心に対するダイス面（山部）の圧縮速度、をそれぞれ示す。）

このグラフより、ねじ山を立たせるためには、少なくとも14 sec<sup>-1</sup>以下の歪み速度で塑性加工を行わなければならないことがわかる。特に好ましい条件は、転造速度の場合と同様な理由により4 sec<sup>-1</sup>以下の歪み速度である。したがって、効果的な加工のためにはこれらの条件を含む速度で加工を行なう必要がある。なお、これらの条件には歪み速度を0に保持する場合も含まれる。ここでは、圧縮速度 $v$ に関して、平ダイスの場合は食付き部の角度、丸ダイスの場合はダイスの寄り速度を用いて計算を行った。このように、一旦、歪み速度に換算し、これを指標にすれば、標準的な条件から外れた転造加工、さらには、転造以外の塑性加工法にも容易にその条件を適用することができ、非常に有用である。実際に、圧造やプレス加工といった他の塑性加工法で残留歪み量（塑性変形量）の歪み速度依存性を確かめたところ、転造と同様な傾向が得られた。したがって、本条件は本材料に対する塑性加工法一般に適用可能である。

【0031】図4は、ねじ外径（ねじ山の成形性）に現れる冷却の効果を示したグラフである。実験に用いた形状記憶ポリマーのガラス転移温度 $T_g$ は55℃である。この

である。これは、塑性変形能が歪み速度によって変わるという材料特性を反映したものであり、本材料では、歪み速度を低減することによって塑性変形能が改善され、成形性が向上することが明らかとなった。

【0029】なお、ねじサイズをM6クラスから変更した場合を考えると、ねじ形状、したがってダイス形状ともJISに規定されたメートルねじでは、ねじサイズの大小によらずその形状はほぼ相似の関係を示すため（ねじ外径と素材径との比は1.1程度になる）、歪み速度は回転速度によってほぼ決定される。したがって、ねじサイズを考慮して加工前の素材（ブランク材）の軸径（ブランク径）を $d_0$ とすると、上述した転造速度条件は、 $20 \times (d_0/5.2)$  cm/sec以下と書き換えることができ、特に好ましい条件は、 $5 \times (d_0/5.2)$  cm/sec以下となる。したがって、効果的な加工のためにはこれらの条件を含む速度で加工を行なう必要がある。なお、これらの条件には転造速度を0に保持する場合も含まれる。

【0030】図3は、図2の転造速度を歪み速度に変換したグラフである。ダイスで圧縮された素材のスプリングバックを十分に小さいとみなし、一軸変形の近似を適用すると、歪み速度は転造速度と素材軸中心に対するダイス面（山部）の圧縮速度を用いて、以下の（7）式のように表すことができる。

【数1】

（7）

グラフより、ねじ山を立たせるためには、少なくとも10℃程度以下と室温よりも低い温度に強制冷却することが効果的であることがわかる。これは転造によって生じた発熱を強制的に取り除く効果に加え、塑性変形直後に生じるスプリングバック量の温度依存性を利用してスプリングバック量を減少させた結果とも考えられる。本形状記憶ポリマーは $T_g$ の移動によって応力-歪み特性の温度依存性もほぼ平行に移動すると考えられるので、異なる $T_g$ の材料に対しては、少なくとも $T_g - (55 - 10) = T_g - 45$ ℃以下の冷却を行う必要がある。特に好ましい条件は、最大変形量の7割を確保できる $T_g - 80$ ℃以下である。この条件は、言うまでもなく、他の塑性加工法にも適用可能である。したがって、本ポリウレタン系形状記憶ポリマーの塑性加工を行うためには、転造速度（歪み速度）を低減するとともに、素材を十分に冷却することが非常に効果的であるということがわかった。

【0032】図5は、この加工法を実現する製造装置の説明図である。図5においては、加工方法として丸ダイス転造盤による転造加工法を取り上げているが、転造装置としては平ダイス（板ダイス）転造盤やプラネタリー

転造盤、あるいは雌ねじ転造盤（タッパー）でもかまわない。丸ダイス転造法は回転する二つの丸ダイス51A、51Bの間に形状記憶ポリマーからなる素材52（ここでは丸棒材）を挟み込み、ダイス面を押し当てることによりダイスに刻まれた形状を転写する加工方法である。最終的に締結体に加工する場合の素材は頭部を含めて注型や射出成形で作製しておく。

【0033】既に、図2、図3で示したように請求項1および請求項2の条件、つまり、歪み速度 $1.4\text{sec}^{-1}$ 以下、および転造速度 $3.8 \times d_0 \text{ cm/sec}$ 以下（ $d_0$ は素材軸径）を実現するためには、駆動モーターとして低速タイプのものを用いるか、あるいはギア機構を設けて速度を低減しなければならない、ここでは高速仕様との互換性を考慮してギア機構を用いている。ダイスの回転移動速度は数値制御されるが、転造速度（素材の転がり速度）としては、成形性からして特に $0.96 \times d_0 \text{ cm/sec}$ 以下の転造速度が望ましく、これは金属素材の転造速度と比較すると超低速である。しかし、素材が柔らかいポリマーであるため、大きなトルクは必要としない。

【0034】53は冷却ガス吹き付けタイプの冷却装置であり、図4に示した請求項3の冷却温度条件（ $T_g - 45^\circ\text{C}$ 以下）をクリアできる能力を有し、断熱冷却によるマイナス数十度の冷却ガス54を吹き付けることができる。温度センサー55は吹き付けノズル56に装備されており、ほぼ素材の温度を表示することができる。ここでは、冷却材としてガスを用いたが、液体を滴下してもよい。また、素材を搬送系の供給口付近57で同様な手

表2 形状記憶ポリマーからなる雄ねじの数値データ

	転造前	転造状態	加熱回復後
外径 $\phi$ (mm)	5.25	5.67	5.26

【0038】以上、述べてきた冷間塑性加工だけではなく、加熱成形・冷却固定法も併せて検討した。比熱の大きな水を用いて $70^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ での加熱および冷却を行ったところ、スナッフフィット状の凸部（突起）を形成することができ、再び $70^\circ\text{C}$ に加熱することによってほぼ完全に形状回復した。ただし、二次賦形に要したヒートサイクルはおおよそ30秒であった。このように、本材料を用い、本冷間塑性加工法および加熱成形・冷却固定法を用いれば、加熱分解コンセプトを実現し得る締結体を作製することができる。

【0039】その基本構造をねじ部品を例にして図7に示す。図7（a）は、形状記憶ポリマーからなる雄形部品（ネジ）に関して、 $T_g$ 以上に加熱することによって雄ねじ部が消滅するという状態変化を表している。ここでは、簡単のために、雄ねじ部が消滅する場合を図示したが、実際には雄ねじ部外径が縮小してもよい。なお、転造によってねじを作製する場合には、ねじの軸部は転造前よりも軸方向に伸びるので、加熱形状回復を行うと軸方向に縮むことになる。

法を用いて冷却し、かつダイスをペルチェ素子などの冷却デバイスで冷却するなど、素材とダイスを個別に冷却してもかまわない。さらに、室温以下に冷却する場合には、転造盤の結露を防ぐため、素材、ダイス周辺に乾燥エアーを流す。

【0035】ここでは、転造盤について本加工法を実現する機構を示したが、圧造ヘッダーやプレス成形機でも同様に考えることができる。以上、本発明の第一の実施例、製造方法に関する実施例を記述した。

【0036】次に、本発明の第二の実施例に係わる形状記憶ポリマーからなる締結体について説明する。まず、図6は第一の実施例に従って作製した雄ねじの形状を示す図であり、用いたポリウレタン系形状記憶ポリマー（商標名ダイアリィ）のガラス転移温度は $55^\circ\text{C}$ である。鋼製ねじと同様な転造条件（転造速度： $33\text{cm/sec}$ 、転造温度：室温）では、素材軸外径 $\phi 5.24\text{mm}$ に対して加工後の軸外径は $\phi 5.26\text{mm}$ とほとんどねじ山は立たなかったが、転造速度を $1\text{cm/sec}$ まで落とし、 $-45^\circ\text{C}$ の強制冷却を行った結果、図6に示す雄ねじ形状が得られた。形状記憶ポリマーに二次賦形で締結機能を有する形状を付与したのは、恐らくこれが初めてだと思われる。また、 $70^\circ\text{C}$ に1分間保持して形状回復特性を確認したところ、図に示した通り、ほぼ完全に形状回復した。数値データを表2に示す。

【0037】

【表2】

【0040】図7（b）は、形状記憶ポリマーからなる雌形部品（ナット）に関して、 $T_g$ 以上に加熱することによって雌ねじ部が消滅するという状態変化を表している。ここでは、簡単のために、雌ねじ部が消滅の場合を図示したが、実際には雌ねじ部内径が拡大してもよい。

【0041】次に、図7の（c）～（e）は上記ねじ部品を用いた締結体の分解状態を示したものである。図7（c）は、請求項6に対応し、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、前記形状記憶ポリマーからなる雄ねじ部の二次賦形前の外径 $d_0$ を嵌合相手の雌ねじ部の内径 $D_1$ よりも小さくすることを特徴とする締結体を示したものである。二次賦形後の雄ねじ部の外径を $d_1$ とすると、式（1）は分解条件を表し、式（2）は締結条件を表す。

$$d_0 < D_1 \quad (1)$$

$$d_1 > D_1 \quad (2)$$

したがって、 $T_g$ 以上に加熱することによって、雄ねじ部の外径を雌ねじ部の内径よりも小さくすることが可能と



なり、分離荷重を零にすることが可能となる。ただし、実際には、形状回復率は100%にはならないので、形状回復した後の雄ねじ部の外径を  $d_0'$  ( $> d_0$ ) とすると、式 (1) は

$$d_0' < D_1 \quad (8)$$

と若干厳しい条件となる。ここでは、簡単のために、雄ねじ部が消滅する場合を図示したが、実際には雄ねじ部外径が縮小してもよく、頭部が縮小・消滅してもよい。

【0042】図7(d)は、請求項7に対応し、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、前記形状記憶ポリマーからなる雌ねじ部の二次賦形前の内径  $D_0$  を嵌合相手の雄ねじ部の外径  $d_1$  よりも大きくすることを特徴とする締結体を示したものである。二次賦形後の雌ねじ部の内径を  $D_1$  とすると、式 (3) は分解条件を表し、式 (4) は締結条件を表す。

$$d_1 < D_0 \quad (3)$$

$$d_1 > D_1 \quad (4)$$

したがって、 $T_g$  以上に加熱することによって、雌ねじ部の内径を雄ねじ部の外径よりも大きくすることが可能となり、分離荷重を零にすることが可能となる。ただし、実際には、形状回復率は100%にはならないので、形状回復した後の雌ねじ部の内径を  $D_0'$  ( $< D_0$ ) とする

$$d_0' < D_0'$$

となり、式 (5) よりも若干厳しくなる。ここでは、簡単のために、雄ねじ部および雌ねじ部が消滅する場合を図示したが、実際には雄ねじ部外径が縮小したり、頭部が縮小・消滅したり、雌ねじ部内径が拡大してもよい。

【0044】このような、雄ねじ部、雌ねじ部の製造方法は、塑性加工による。具体的には、転造、圧造、プレス成形である。転造の場合、通常の金属製品と同様、雄ねじは転造ダイスを用いた転造、雌ねじのは塑性加工タイプの転造タップを用いた転造を行えばよい。なお、雄ねじ部の外径が縮小する場合、雌ねじ部の内径が拡大する場合には、切削加工でねじ部を成形することもできる。さらに、雌ねじ部の内径が拡大する場合には、タッピングねじによって雌ねじ部を成形してもよい。

【0045】圧造の場合、素材を軸方向に圧縮すると素材自身が径方向に広がろうとするので、割ダイスにより雄ねじを成形する。雌ねじでは素材を軸方向に圧縮すると内径方向に収縮しようとするので雄ねじが形成されているダイスを挿入した状態で素材を軸方向に圧縮し、雌ねじを成形する。あるいは、素材内に雄ねじが形成されているダイスを挿入した状態でテーパ状に内径が狭くなっているダイスの中へ圧入することによって素材の径方向に圧縮し、雌ねじを成形する。

【0046】プレスの場合、雌ねじ形状が形成された割ダイスを径方向に押し当てて雄ねじを成形する。雌ねじの場合には、素材に雄ねじが形成されているダイスを挿入した状態で径方向に単純に圧縮すればよい。圧造、プレスの場合、雌ねじ成形のために穴に挿入した、雄ねじ

と、式 (3) は

$$d_1 < D_0' \quad (9)$$

と若干厳しい条件になる。ここでは、簡単のために、雌ねじ部が消滅する場合を図示したが、実際には雌ねじ部内径が拡大してもよい。

【0043】さらに、図7(e)は、請求項8に対応し、互いに嵌合しあう雄形、雌形からなる締結体において、雄ねじ、雌ねじとも形状記憶ポリマーの二次賦形によって形成されている場合に、雌ねじ部の二次賦形前の内径を嵌合相手の雄ねじ部の二次賦形前の外径よりも大きくすることを特徴とする締結体を示したものである。今までの記号を用いると、式 (5) は分解条件を表し、式 (6) は締結条件を表す。

$$d_0 < D_0 \quad (5)$$

$$d_1 > D_1 \quad (6)$$

したがって、 $T_g$  以上に加熱することによって、雌ねじ部の内径を雄ねじ部の外径よりも大きくすることが可能となり、分離荷重を零にすることが可能となる。このとき、式 (5)、(6) からなる条件は、請求項6、7の条件よりも緩くなる。ただし、実際には、形状回復率は100%にはならないので、形状回復後の内外径を用いると

$$(10)$$

が形成されているダイスは、雌ねじ成形後、雌ねじあるいはダイスのどちらかを回転させながら引抜けばよく、割ダイスにしておけばダイスの組み方を変えて割ダイス全体の外径を縮小することにより、ダイスを単純に引抜くことも可能になる。

【0047】ここで具体的に述べた方法以外にも、もちろん、加熱成形・冷却固定による成形方法を用いてもよい。実際、式 (1)、(6) に従い、雄ねじの転造前外径をナット部品の内径よりも0.1mm小さくすることにより、加熱分解コンセプトを実現した締結体のデータを図8に示す。作製した締結体は両側に雄ねじ部を有するスタッドタイプのねじであり、嵌合相手には金属ナットを用いた。図8(b)は恒温槽の中で引張り試験を行った分解試験のイメージ図であり、図8(a)は試験結果である。図8(b)に示す通り、転造状態のねじを室温で引張ったものは、通常の金属ねじ同様軸部ではなくねじ部で破断し、ねじ山自体の強度が高いことを示した。また、その時の最大引張り荷重は119.1kgfと十分な値を示した。この値は有効断面積を用いて応力表示に換算すると58MPaとなるが、これは硬質塩化ビニール(PVC)が示す値(47~51MPa)よりも大きく、ポリカーボネート(PC)が示す値(54~60MPa)と同等である。つまり、ポリマーねじ(プラスチックねじ)として十分な強度を有することが確認できた。次に  $T_g + 20^\circ\text{C}$  で形状回復後、室温ならびに  $T_g + 20^\circ\text{C}$  での分解モードを確認しようとしたところ、加熱途中で雄ねじが消滅し、重力により金属ナットが脱落して分解した。

【0048】以上のようにポリウレタン系形状記憶ポリマーを用い、新たに開発した加工方法を駆使し、雄ねじの外径と形状回復後の外径、雌ねじ内径との間に適切な条件を設定すれば、加熱分解機能を有する図1のような締結体を実現することが可能となる。なお、この実施例では、雄ねじとナットという単純な組み合わせであったが、他の機能を有する雄ねじ部品と雌ねじ部品という組み合わせでも同様に加熱分解機能をもつ締結体を得られる。

【0049】次に、本発明の第三の実施例に係わる形状記憶ポリマーの締結体について説明する。第二の実施例はいわゆるねじ部品に関するものであり、それ以外の、スナップフィット等の締結体を第三の実施例として図9に取り上げる。図9(a)は請求項6、図9(b)は請求項7、図9(c)は請求項8に対応する構造である。内径、外径に関する条件、および作製方法は第二の実施例の場合と同様である。また、図には明らかに示されていないが、雄形締結体に関しては締結機能部の外径が縮小してもよく、雌形締結体に関しては締結機能部、あるいは嵌合部の内径が拡大してもよい。嵌合部の内径が拡大するとは、例えば、91e状のスナップフィットに対して嵌合相手のパイプ状雌部品の内径が拡大して分解する場合を指す。なお、図9では、簡単のため断面構造のみを示すとともに被締結物は図7と同様省略している。

【0050】最後に、本発明の第四の実施例に係わる形状記憶ポリマーからなる締結体の分解方法について説明する。本発明は請求項9に記載された分解方法に関するものであり、形状記憶ポリマーからなる締結体を $T_g$ 以上に加熱して軟化させ、分離荷重を低減させて分解を容易にする手法である。図10にその実例を示す。雄ねじ部品は形状記憶ポリマーからなり、雌ねじ部品は金属製である。ナット部品の内径を雄ねじの転造前外径よりも0.1mm小さくした点以外は、第二の実施例の図8と同様である。このとき、雄ねじ部の二次賦形前の外径は雌ねじ部の内径よりも大きく、 $T_g$ 以上に加熱しても重力による自動的な分解は起こらない。ところが、急激に軟化するため、 $T_g$ 以上の温度条件では微小な外力で分解することが可能になる。実際、転造状態での最大引張り荷重は、119.2kgfであったが、 $T_g+20^\circ\text{C}$ に加熱したまま引張ると僅か0.8kgfの力で分解可能であった。したがって、分解に際して微小な外力を想定することが許容されるならば、加熱により完全に形状回復する必要性はなく、二次賦形を行わない一次賦形のままの形状でもよく、さらには切削加工で締結機能部を成形してもよい。この分解方法によれば形状の制約をほとんど受けることなく、多種多様な構造の締結体を僅かな外力で一度に分解することができる。図11および図12に対象となり得るプラスチック締結体の構造を示す。なお、本分解法の性質上、実施例2、3の締結体も本分解法の対象になる。また、これら締結体は請求項4から8のいずれかに対応してい

るが、本分解方法では、二次賦形の必要性、形状回復特性等の制限が緩和され得るので、特にポリウレタン系の形状記憶ポリマーでなくてもかまわない。

#### 【0051】

【発明の効果】本発明によれば、ポリウレタン系形状記憶ポリマーの材料特性を反映した塑性加工方法により、従来困難であった冷間塑性加工法を可能にした。これによって、ポリウレタン系形状記憶ポリマーの二次賦形が量産レベルで可能になり、複雑な形状を持ち、加熱形状回復特性を有するなど付加価値の高い形状記憶ポリマー製品を安価で大量に供給できるようになる。また、本発明によれば、加熱によって形状を回復する製品、特に締結体を製造することが可能となり、これによって、室温では十分な締結力を持ちながらも、ガラス転移温度 $T_g$ 以上で締結力を失う締結体の実用化が可能になる。さらに本発明によれば、前記加熱分解機能を有する締結体の加熱による形状回復が不完全な場合でも、加熱軟化により容易に分解を行うことができる。

【0052】これらによって、従来破碎によって分解していた製品でも容易に解体することが可能になるので部品に損傷を与えないリサイクルが可能になる。また、作業者の負担を減じ、また安全性を向上することが可能になり、分解・リサイクルに要する時間を大幅に削減することも可能になるので、コスト低減にも大きく貢献できる。このため、来るべきリサイクル社会の到来を加速化することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 形状記憶ポリマーからなる加熱分解機能を有する締結体の概念図である。

【図2】 ねじ外径の転造速度依存性を示す特性図である。

【図3】 ねじ外径の歪み速度依存性を示す特性図である。

【図4】 ねじ外径の転造温度依存性を示す特性図である。

【図5】 本発明の第一の実施例に係わる製造装置の説明図である。

【図6】 本発明の第二の実施例に係わる雄ねじの形状と加熱形状回復後の形状を示す説明図である。

【図7】 本発明の第二の実施例に係わる締結体(ねじ部品)の加熱分解を示す説明図であり、(a)は、雄ねじ部品の加熱形状回復を示す説明図、(b)は、雌ねじ部品の加熱形状回復を示す説明図、(c)は、雄ねじ部品の加熱形状回復による分解を示す説明図、(d)は、雌ねじ部品の加熱形状回復による分解を示す説明図、(e)は、雄ねじ部品、雌ねじ部品の加熱形状回復による分解を示す説明図である。

【図8】 本発明の第二の実施例に係わる形状記憶ポリマーからなる締結体の保持/加熱分解特性を示す図表であり、(a)は、試験結果を示す表、(b)は、試験イ

メージ図である。

【図9】 本発明の第三の実施例に係わる締結体の構造および加熱分解を示す説明図であり、(a)は、雄形部品の加熱形状回復による分解を示す説明図、(b)は、雌形部品の加熱形状回復による分解を示す説明図、

(c)は、雄形部品、雌形部品の加熱形状回復による分解を示す説明図である。

【図10】 本発明の第四の実施例に係わる分解手法を適用した締結体の保持/加熱分解特性を示す図表である。

【図11】 本発明の第四の実施例に係わる締結体の斜視図であり、(a)は、雄ねじ部品の斜視図、(b)は、雌ねじ部品の斜視図である。

【図12】 本発明の第四の実施例に係わる締結体の斜視図であり、ファスナー部品の斜視図である。

【符号の説明】

11 形状記憶ポリマーからなるねじ

12 二次賦形によるねじ

13 形状回復して消滅したねじ部

14 ナット

51A、51B 丸ダイス

52 転造素材

53 冷却装置

54 冷却ガス

55 温度センサー

56 吹き付けノズル

57 搬送系

10 71a~71h ねじ

72a~72h ナット

91a~91n 雄形部品

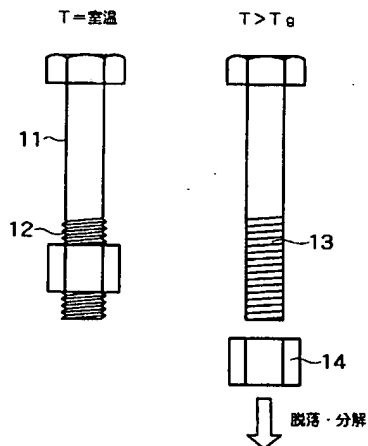
91a~92n 雌形部品

111a~111l 形状記憶ポリマーからなるねじ類

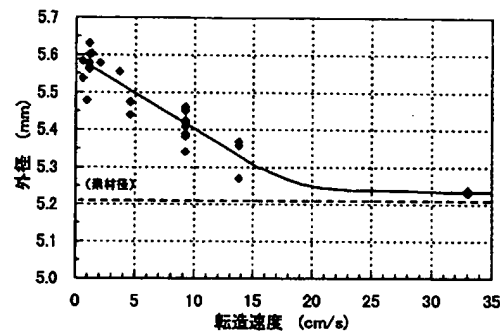
112a~112e 形状記憶ポリマーからなるナット類

113a~113x 形状記憶ポリマーからなるファスナー類

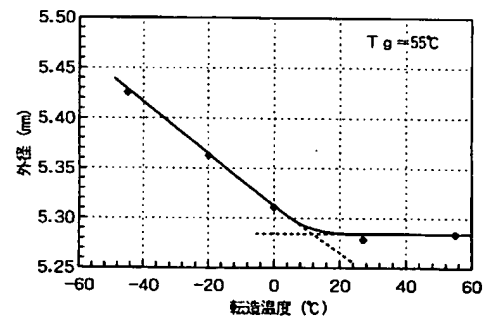
【図1】



【図2】



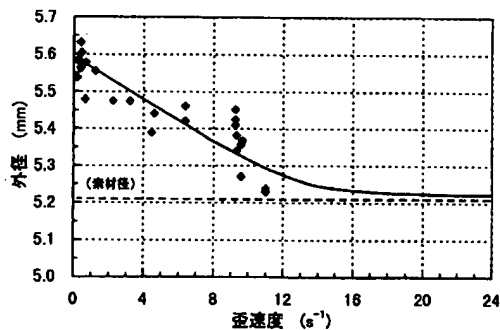
【図4】



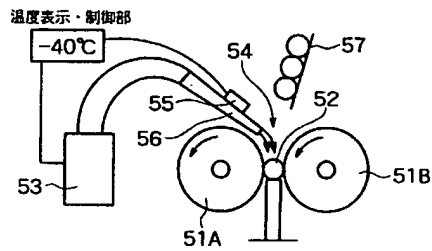
【図6】

	転造状態	加熱回復後
ねじ形状		

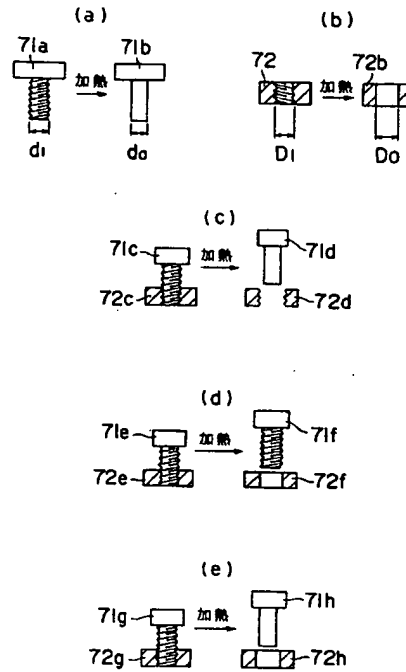
【図3】



【図5】



【図7】

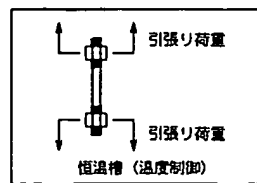


【図8】

(a)

引張り前の状態	転送状態	加熱回復後	
引張り時の温度	室温	室温	$T_g+20^{\circ}\text{C}$
最大引張り荷重 (kgf)	119.1	0	0
終了モード	ねじ部破断	昇温中ナット脱落	昇温中ナット脱落
分解モード	破壊	外力不要	外力不要

(b)



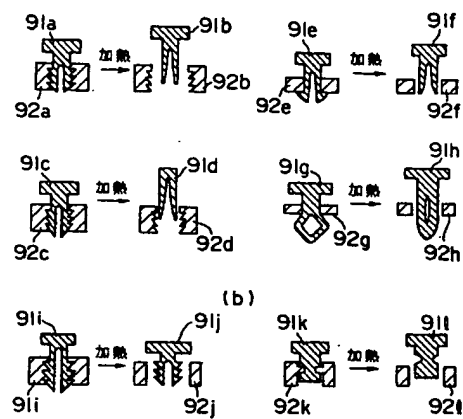
引張り・分解試験イメージ

【図10】

引張り前の状態	転送状態	加熱回復後	
引張り時の温度	室温	室温	$T_g+20^{\circ}\text{C}$
最大引張り荷重 (kgf)	119.2	83.4	0.8
終了モード	ねじ部破断	ナット抜け	ナット抜け
分解モード	破壊	外力必要	外力必要

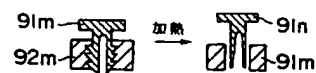
【図9】

(a)

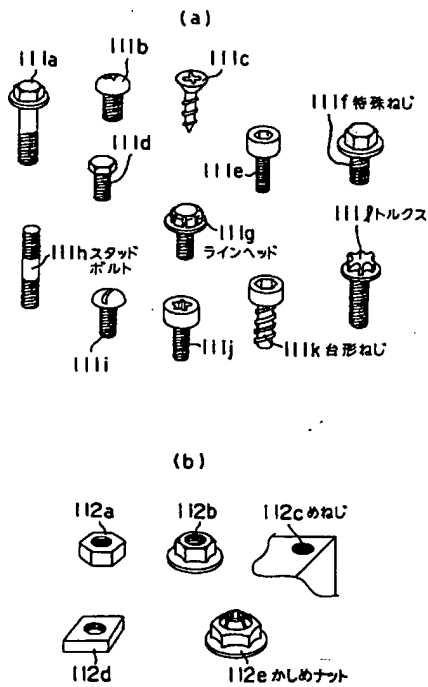


(b)

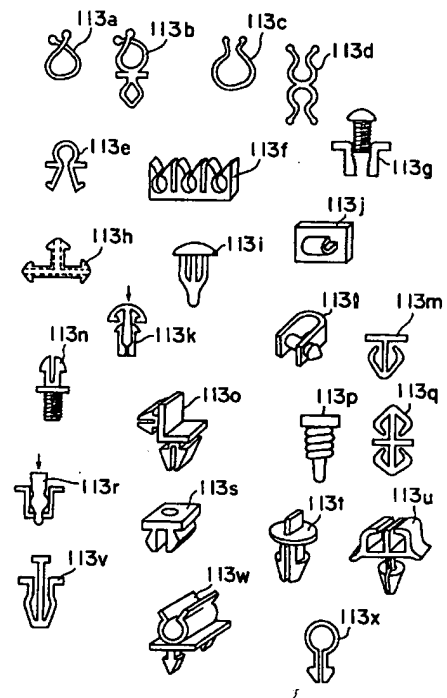
(c)



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(72)発明者 大橋 真  
愛知県名古屋市中村区椿町17番15号 メイ  
ラ株式会社内  
(72)発明者 松本 健巳  
愛知県名古屋市中村区椿町17番15号 メイ  
ラ株式会社内

(72)発明者 直井 学  
愛知県名古屋市中村区椿町17番15号 メイ  
ラ株式会社内  
(72)発明者 永田 佐登司  
愛知県名古屋市中村区岩塚町字九反所60番  
地の1 中菱エンジニアリング株式会社内  
Fターム(参考) 3J036 AA03 BA01 BA03  
4F204 AA31 AA42 AE01 AG28 AH06  
AR06 AR08 FA01 FB01 FN11  
FN15